

УДК 621.3

Г.М. Колиушко, Д.Г. Колиушко, С.С. Руденко

К ВОПРОСУ ПОВЫШЕНИЯ ТОЧНОСТИ РАСЧЕТА НОРМИРУЕМЫХ ПАРАМЕТРОВ ЗАЗЕМЛЯЮЩИХ УСТРОЙСТВ ДЕЙСТВУЮЩИХ ЭЛЕКТРОУСТАНОВОК

В роботі проаналізовано фактори, які впливають на точність розрахунку нормованих параметрів заземлювальних пристроїв діючих електроустановок. Були розроблені та запропоновані напрями для підвищення точності розрахунку нормованих параметрів заземлювальних пристроїв, які полягають у вдосконаленні як експериментального, так і розрахункового етапів електромагнітної діагностики стану систем заземлення.

В работе проанализированы факторы, влияющие на точность расчета нормируемых параметров заземляющих устройств. Были выработаны направления и предложены способы для повышения точности расчетов нормированных параметров заземляющих устройств, заключающиеся в усовершенствовании как экспериментального, так и расчетного этапов электромагнитной диагностики состояния системы заземления.

ПОСТАНОВКА ПРОБЛЕМЫ

Одним из важнейших элементов электроустановки является заземляющее устройство (ЗУ), предназначенное для обеспечения электробезопасности обслуживающего персонала и нормального функционирования оборудования. По своему конструктивному исполнению наиболее сложными являются ЗУ открытые распределительные устройства. В процессе эксплуатации как ЗУ, так и сама электроустановка претерпевают изменения, которые могут привести к тому, что параметры ЗУ не будут удовлетворять нормативным величинам по следующим причинам:

- воздействия коррозии на элементы ЗУ (нарушения целостности сетки ЗУ и повреждения заземляющих спусков на границе земля-воздух);
- некорректного восстановления заземления старых и подсоединения новых единиц оборудования к существующему ЗУ (последовательного соединения оборудования, присоединения к металлическим частям, не имеющим гальванической связи с ЗУ);
- повреждения ЗУ в результате замены или ремонта оборудования (обрывов горизонтальных заземлителей при земляных работах);
- увеличения мощности электроустановки с ростом значений токов короткого замыкания (КЗ) (возможного превышения допустимых значений напряжения прикосновения и потенциала на ЗУ).

Для оценки работоспособности ЗУ используются нормируемые параметры [1], которые периодически контролируются в течение всего срока эксплуатации [2]. К ним относят: сопротивление ЗУ, напряжение на ЗУ и напряжение прикосновения. На эти величины оказывают влияние следующие факторы: конструктивное исполнение ЗУ, электрофизические параметры грунта (удельное сопротивление и мощность слоев) и характеристики объекта (значение тока КЗ, время срабатывания защиты, класс напряжения и т.д.).

Определение сопротивления ЗУ в процессе эксплуатации можно производить как экспериментально, так и расчетным путем, однако, напряжение прикосновения при реальном токе замыкания на землю и потенциал на ЗУ можно найти только путем выполнения соответствующих вычислений, как правило, с помощью специальных компьютерных программ.

На основании результатов расчета вырабатываются рекомендации по реконструкции ЗУ, а также проверяется их эффективность.

Целью работы является анализ факторов, влияющих на точность расчета нормируемых параметров ЗУ, а также определение направлений для ее повышения.

1. ОБЩИЙ АНАЛИЗ

Методика электромагнитной диагностики (ЭМД) состояния ЗУ энергообъектов, которая получила распространение в Украине, предполагает выполнение трех этапов [3].

Основной целью ЭМД является разработка рекомендаций по реконструкции ЗУ для приведения его в соответствие с требованиями нормативных документов. Это является сложной технической задачей, поскольку при ее решении необходимо определить оптимальные места прокладки заземлителей для экономии трудовых и материальных затрат и реализовать наиболее полное использование существующего ЗУ.

В упрощенном виде процесс решения задачи можно представить в виде блок-схемы (см. рис. 1). Из рис. 1 видно, что первый этап ЭМД включает в себя такие экспериментальные исследования, как:

- определение конструктивного исполнения ЗУ, необходимого для построения математической модели ЗУ, находящегося в двухслойном грунте;
- определение электрофизических параметров грунта методом вертикального электрического зондирования (ВЭЗ);
- измерение электрических параметров ЗУ, необходимых для оценки адекватности математической модели реальному ЗУ.

В последний пункт входят измерения сопротивления растеканию токов КЗ с ЗУ, а также напряжения прикосновения и напряжения на ЗУ относительно одной из единиц оборудования при имитации КЗ.

Результаты этих экспериментальных исследований совместно с характеристиками энергообъекта (его типом, классом напряжения, величиной токов КЗ, временем срабатывания защиты, режимом работы нейтрали трансформаторов), являются исходными данными для проведения расчетов на втором этапе.

© Г.М. Колиушко, Д.Г. Колиушко, С.С. Руденко

При проведении расчетов математическая модель ЗУ вместе со средствами интерпретации кривых ВЭЗ и эквивалентирования грунта образуют программно-аппаратный комплекс, позволяющий рассчитать нормируемые параметры ЗУ.

На третьем этапе производится разработка необходимых рекомендаций, а также на основании сравнения расчетных ($P_{рас.}$) и допустимых ($P_{доп.}$) оценивается целесообразность введения дополнительных рекомендаций для проведения реконструкции ЗУ.

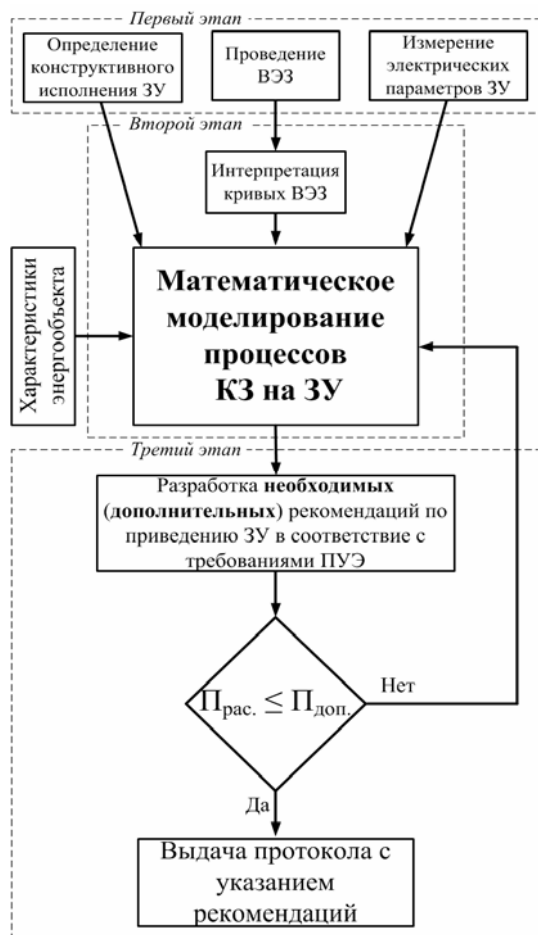


Рис. 1

Погрешность определения нормируемых параметров ЗУ вносится при выполнении первого и второго этапа ЭМД. Поэтому факторы, которые могут влиять на точность расчета, следует выделять на основании анализа указанных этапов.

2. АНАЛИЗ ПЕРВОГО ЭТАПА

1) определение конструктивного исполнения ЗУ

Под процедурой определения конструктивного исполнения ЗУ подразумевается нахождение расположения и глубины залегания заземлителей, а также путей растекания тока с оборудования.

Контроль конструктивного исполнения ЗУ осуществляется визуальным или индукционным методами. Визуальная проверка проводится после монтажа перед присоединением естественных заземлителей и заземляющих элементов до засыпки грунта [2]. Применение этого метода в действующих электроустановках является трудоемким и материально затрат-

ным из-за необходимости откапывания элементов ЗУ. Поэтому наибольшее распространение получил индукционный метод [2, 3], позволяющий определить конструктивное исполнение ЗУ без вскрытия грунта и отключения оборудования.

Для обнаружения горизонтальных заземлителей (ГЗ) применяются различные приборы и комплексы [4] (например: трассоискатель ТМ-5 с генератором ТГ-12 или КДЗ-1У), а также технические средства [5, 6], позволяющие определить наличие вертикальных заземлителей (ВЗ).

В целом методика определения конструктивного исполнения ЗУ характеризуется значительной проработкой и практической реализацией, а к актуальным проблемам, возникающим на данном этапе, относят:

- отсутствие возможности определения длины ВЗ и их отыскания в местах пересечения ГЗ, а также
- отсутствие различий в идентификации ГЗ и трассы кабеля, по оплетке которого протекает инжектируемый ток.

Перечисленные факторы влияют на точность соответствия расчетной схемы в части конструктивного исполнения, что повышает погрешность расчета и может привести либо к неоправданному росту материальных затрат при реконструкции ЗУ, либо к превышению допустимых значений нормируемых параметров.

2) проведение ВЭЗ

Целью проведения ВЭЗ является определение параметров геоэлектрической структуры [7-14] путем инжектирования генератором испытательного тока и измерения падения напряжения на определенном участке поверхности грунта. При этом величина разности токовых и потенциальных электродов обуславливается типом установки и глубиной зондирования. Электрофизические характеристики грунта (количество слоев, их удельное сопротивление и мощность) определяют с использованием различных средств интерпретации (палеток или специальных расчетных программ) [7-10].

Аппаратура, методика проведения ВЭЗ и средства интерпретации являются хорошо развитыми как теоретически, так и практически в рамках проведения геологических изысканий [9].

В настоящее время известен ряд специализированных компьютерных программ для 1-D, 2-D и 3-D интерпретации ВЭЗ, а также множество установок для проведения ВЭЗ, позволяющих решать узконаправленные геологические задачи [8, 9, 11, 12]. Однако, при проектировании и диагностике ЗУ для проведения ВЭЗ обычно используют четырехэлектродные симметричные установки Веннера и Шлюберже, или несимметричные Бургсдорфа [7, 10, 13], что связано с особенностями представления грунта в математических моделях для расчета нормируемых параметров ЗУ (т.е. в виде слоистого проводящего полупространства с плоскопараллельными границами раздела).

Полученные при интерпретации данных ВЭЗ результаты (соотношение удельных сопротивлений слоев, их мощность и число) фактически определяют величину нормируемых параметров при расчете кон-

кретной конфигурации ЗУ. Но при этом в известных публикациях вопросам проведения ВЭЗ, применяемым приборам и средствам интерпретации кривых ВЭЗ при контроле состояния ЗУ на действующих электроустановках уделяется недостаточно внимания:

- не сформулированы критерии выбора установки в зависимости от особенностей объекта;
- отсутствуют четкие требования к используемым приборам при проведении ВЭЗ, в зависимости от величины удельного сопротивления грунта и глубины зондирования;
- однозначная зависимость между размерами ЗУ и величиной разности токовых электродов, фактически определяющих глубину зондирования, в работе [7] приведена только для несимметричной установки Бургсдорфа без теоретического обоснования или экспериментального подтверждения.

Кроме этого, математический аппарат и специальные программы, определяющие структуру многослойного грунта на основании данных ВЭЗ, предназначены для решения узконаправленных геологических задач и не адаптированы к применению при ЭМД ЗУ, а применение существующих универсальных палеток является трудоемким и неоднозначным.

В НИПКИ "Молния" при проведении диагностики ЗУ используется установка Веннера, которая характеризуется рядом таких преимуществ, как:

- высокий уровень сигнала;
- хорошая чувствительность к горизонтальным границам раздела слоев;
- слабая чувствительность к вертикальным границам, которая ослабляет влияние нетипичных включений, имеющих локальный характер и не оказывающих значительного влияния на растекание токов с ЗУ.

Существенным недостатком установки Веннера можно считать малую глубину зондирования, которая ориентировочно равна 1/3 от величины разности токовых электродов [12]. При этом отметим, что в настоящее время не существует единого мнения в части глубинности установок ВЭЗ (в том числе и установки Веннера), поэтому для её оценки могут быть использованы различные способы [14].

Согласно результатам, приведенным в работе [7], наибольшая диагональ ЗУ D фактически определяет требуемую глубину зондирования. Учитывая, что место для проведения ВЭЗ ограничено несколькими десятками метров (поскольку ЗУ исследуемых объектов зачастую окружены промышленными и жилыми сооружениями, коммуникациями и т.п.), то актуальной является оценка требуемой глубины зондирования.

На рис. 2 приведена гистограмма плотности вероятности наибольшей диагонали для 466 ЗУ электрических подстанций, диагностика которых была проведена в период с 2007 по 2012 гг.

Из анализа рис. 2 следует, что для 65 % ЗУ наибольшая диагональ лежит в пределах 20-100 м, т.е. величина разности токовых электродов при применении установки Веннера, согласно работе [7], составляет 60-300 м соответственно, что может быть реализуемым на практике. С учетом того, что оставшиеся 35 % ЗУ являются частью стратегически важных объектов (т.е. относятся к ОРУ магистральных подстанций классом

напряжения от 220 кВ до 750 кВ, а также АЭС, ТЭС и ГЭС), а разнос электродов на 360-3000 м практически невозможен из-за отсутствия свободной территории вблизи большинства таких объектов, то необходимо решить следующие задачи:

- 1) провести анализ существующих методик проведения ВЭЗ и разработать рекомендации по их применимости для конкретных объектов;
- 2) исследовать эффективную глубину растекания тока КЗ с ЗУ в случае многослойных грунтов для определения величины разности электродов установок ВЭЗ при диагностике ЗУ действующих энергообъектов;
- 3) разработать новую методику проведения ВЭЗ вблизи ОРУ при диагностике ЗУ с $D > 360$ м, а также средства интерпретации его результатов;
- 4) разработать методики проведения ВЭЗ на территории ОРУ, учитывающей влияние ЗУ.

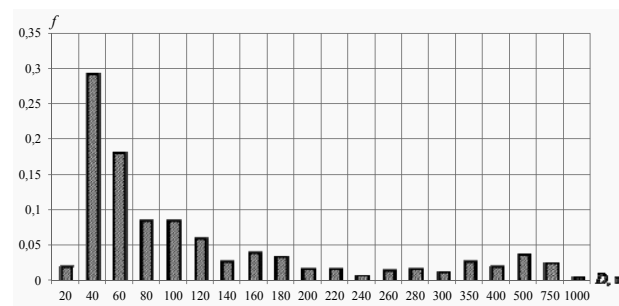


Рис. 2

Отметим, что основой методики проведения ВЭЗ вблизи ОРУ при диагностике ЗУ с $D > 360$ м может быть комбинированный способ проведения ВЭЗ с помощью установок Веннера (для верхних слоев) и Шлюмберже (для нижних слоев), в которой глубина зондирования (согласно работе [12]) на 10-30 % больше. Это позволяет оптимально использовать достоинства существующих установок ВЭЗ применительно к диагностике ЗУ действующих электроустановок.

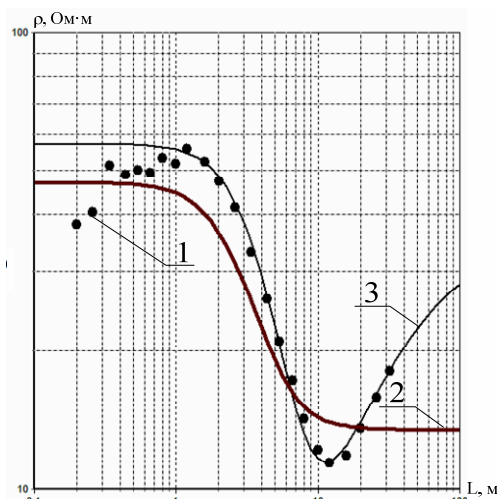
3. АНАЛИЗ ВТОРОГО ЭТАПА

1) интерпретация результатов ВЭЗ

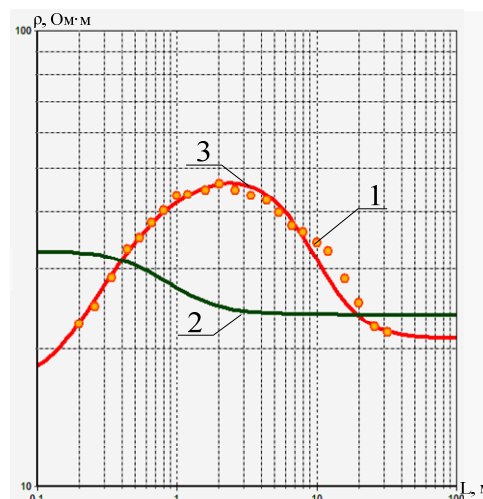
В настоящее время в НИПКИ "Молния" разработаны и используются компьютерные программы "ВЭЗ-3" [15] и "ВЭЗ-2-Авто" [16], позволяющие интерпретировать результаты ВЭЗ в трехслойную и двухслойную геоэлектрическую структуру грунта соответственно. Однако получаемые при проведении ЭМД ЗУ кривые ВЭЗ чаще всего соответствуют геоэлектрической структуре с числом слоев три и более.

В частности, на ряде электрических подстанций классом напряжения 35 кВ, расположенных на севере Украины, в результате проведения ВЭЗ были получены кривые характерные для четырехслойной структуры грунта, одна из которых приведена на рис. 3.

Как следует из рис. 3, ни трехслойная модель, ни тем более двухслойная не позволяют с достаточной точностью описать полученные экспериментальные точки кривой ВЭЗ. Поэтому разработка средств и методов интерпретации результатов ВЭЗ, полученных с помощью установки Веннера, для грунтов с количеством слоев более трех также является актуальной задачей для повышения точности расчета ЗУ.



1 – экспериментальные значения; 2 – кривая интерпретации двухслойной моделью грунта; 3 – кривая интерпретации трехслойной моделью грунта
Рис. 3



1 – экспериментальные значения; 2 – кривая интерпретации двухслойной моделью грунта; 3 – кривая интерпретации трехслойной моделью грунта
Рис. 4

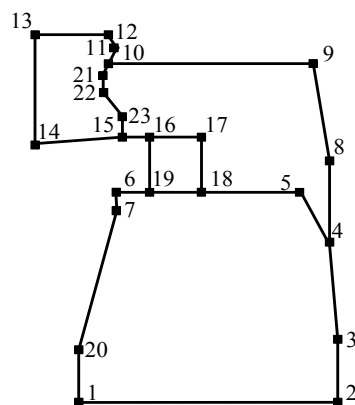
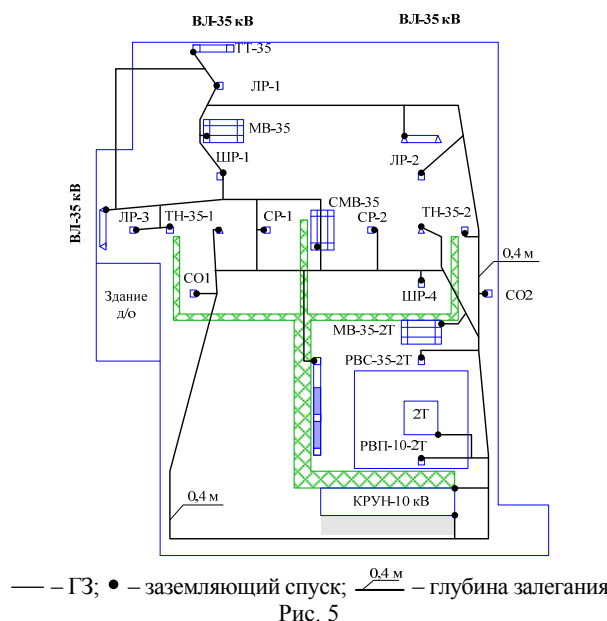
2) математическое моделирование процессов КЗ на ЗУ

Как показывает практика, используемая в настоящее время для расчета нормируемых параметров при КЗ математическая модель неэквивалентного ЗУ, размещенного в двухслойном грунте [17], может давать существенную погрешность. В значительной степени это связано с методической погрешностью: например, исследуемое ЗУ находится в трехслойном грунте, а приведение его к эквивалентному двухслойному значительно искажает картину распределения электрического поля.

В результате проведения ЭМД ЗУ одной из подстанций классом напряжения 35 кВ, расположенной на севере Украины, была зафиксирована значительная погрешность при расчете его сопротивления. Учитывая, что вблизи подстанции нет коммуникаций, и с нее не осуществляется вынос потенциала, наиболее вероятной причиной погрешности расчета являлось приведение ярко выраженной трехслойной структуры грунта (которую отражает кривая 3 на рис. 4) к эквивалентной двухслойной структуре (которую отражает кривая 2 на рис. 4). При этом глубина эквивалентирования согласно рекомендациям работы [7] равнялась максимальной глубине залегания ГЗ – 0,4 м.

На рис. 5 приведен план данной подстанции с ЗУ, определенным индукционным методом. Для оценки методической погрешности, вызванной представлением трехслойного грунта в виде эквивалентного двухслойного, был произведен расчет потенциала для сетки ЗУ подстанции (см. рис. 6), образованной бесконечно тонкими электродами, начало и конец которых представлены номерами узлов 1-23. При проведении расчета заземляющие спуски не учитывались, так как их вклад в распределение потенциала незначителен.

Для моделирования ЗУ использовалась тестовая программа, основанная на модели поля точечного источника тока [18], расположенного в трехслойном проводящем полупространстве, которая позволяет рассчитать распределение потенциалов поля при заданной плотности тока.



На первом этапе оценивалась эквивалентность результатов расчета, полученных с использованием разработанной модели и модели [17]. Средняя погрешность найденных потенциалов в узлах сетки 1-23 составила менее 0,15 % при использовании в обоих

случаях эквивалентной двухслойной геоэлектрической структуры (представленной кривой 2 на рис. 4). Таким образом, результаты, полученные с помощью тестовой модели, являются достоверными.

На втором этапе рассчитывалось распределение потенциалов в узлах ЗУ (см. рис. 6) для двух типов грунта: исходного трехслойного (представленного кривой 3 на рис. 4) и эквивалентного ему двухслойного (представленного кривой 2 на рис. 4).

В табл. 1 показаны погрешности расчета потенциала для различных глубин: на поверхности грунта ($z = 0$ м), на глубине залегания ЗУ ($z = 0,42$ м) и на глубине равной наибольшей диагонали ЗУ ($z = 35$ м).

Таблица 1

Номер узла	Погрешность расчета потенциала δ , %		
	$z = 0$ м	$z = 0,42$ м	$z = 35$ м
1	24	34	-8,2
2	24,3	34,1	-8,2
3	24,5	33,6	-8
4	28,7	38,4	-7,8
5	30,9	37,2	-7,7
6	29,7	36	-7,6
7	28,5	35	-7,6
8	27,7	35	-7,8
9	23,4	32,6	-7,9
10	32,7	40,9	-7,8
11	32,2	38,1	-7,8
12	29,3	36,4	-7,9
13	25,6	34,4	-8,1
14	25,2	33,4	-7,8
15	34	41,2	-7,6
16	33,8	41,1	-7,6
17	28,9	35,4	-7,6
18	30,6	38,4	-7,5
19	31,9	39,7	-7,6
20	24,5	33,5	-8
21	33	38,9	-7,8
22	32,6	38,5	-7,7
23	34,2	39,3	-7,7

При анализе результатов, приведенных в табл. 1, видно, что погрешность расчета потенциалов на поверхности земли (используемых при определении напряжения прикосновения) находится в пределах 32,6 % – 41,2 %, а на глубине залегания ЗУ (используемых для определения сопротивления и потенциала ЗУ) – от 23,4% до 34,2%.

Таким образом, методическая погрешность, вносимая приведением трехслойной геоэлектрической структуры к эквивалентной двухслойной, может оказывать существенное влияние на результаты моделирования процессов КЗ на ЗУ. Для ее устранения необходимо разработать математическую модель неэквивалентного ЗУ произвольной конфигурации, размещенного в трехслойном грунте.

ВЫВОДЫ

Проведенный в работе анализ показал, что на точность расчета нормируемых параметров ЗУ влияют следующие факторы:

- ошибка при определении конструктивного выполнения ЗУ (неучет ВЗ, недостаточно точное определение глубины залегания ЗУ, идентификация ГЗ);

- погрешность, при проведении ВЭЗ и интерпретации его результатов (недостаточная глубина зондирования, отсутствие средств интерпретации многослойных структур);

- методическая погрешность математической модели из-за приведения многослойной геоэлектрической структуры к эквивалентной двухслойной.

Для повышения точности расчёта необходимо:

1. Разработать методику определения длины вертикальных заземлителей и их наличия в местах пересечения горизонтальных шин, а также определения отключений между заземлителем и кабелем, по оплетке которого протекает инжектируемый ток.

2. Разработать математический аппарат для интерпретации результатов ВЭЗ, полученных установкой Веннера, для геоэлектрических структур с числом слоев более трех применительно к ЭМД ЗУ.

3. Определить глубину зондирования, достаточную для проведения расчетов в зависимости от площади или наибольшей диагонали ЗУ.

4. Сформулировать критерии для выбора типа установки ВЭЗ и используемых приборов при проведении ЭМД состояния ЗУ в зависимости от характеристик энергообъекта и параметров грунта.

5. Разработать комбинированную методику ВЭЗ, позволяющую проводить зондирование грунта на достаточную глубину в условиях плотной застройки территории энергообъекта и вблизи него, а также математический аппарат и программные средства для интерпретации полученных данных.

6. Разработать математическую модель неэквивалентного ЗУ произвольной конфигурации, размещенного в трехслойном грунте.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Правила улаштування електроустановок. Розділ 1. Загальні правила. Глава 1.7. Заземлення і захисні заходи від ураження електричним струмом [Чинний від 29.06.2011]. – К.: Міненерговугілля України, 2011. – 72 с. – (Національний стандарт України).
2. Випробування та контроль пристроїв заземлення електроустановок. Типова інструкція. СОУ 31.2-21677681-19:2009 [Чинний від 29.03.2010]. – К.: Мінпаливенерго України, 2010. – 54 с. – (Національний стандарт України).
3. Борисов Р.К., Колиушко Г.М., Гримуд Г.И. Методика исследования заземляющих устройств объектов электроэнергетики // Энергетика и электрификация. – 2000. – №4. – С. 29-32.
4. Колиушко Г.М., Доценко В.И., Колиушко Д.Г., Недзельский О.С. Измерительный комплекс для проведения диагностики состояния заземляющих устройств электроэнергообъектов // Вісник НТУ "ХПІ". Серія: Електроенергетика і перетворююча техніка. – 2002. – №7. – С. 157-166.
5. Резинкин О.Л., Колиушко Д.Г. Индукционный датчик для диагностики контуров заземления высоковольтных подстанций // Энергетика и электрификация. – 1999. – №8. – С. 36-39.
6. Кандаев В.А., Свешников Н.Ю. Метод определения контакта между вертикальным элементом и сеткой контура заземления // Первая Российская конференция по заземляющим устройствам: сборник докл. – Новосибирск, 2002. – С. 149-155.
7. Коструба С.И. Измерение электрических параметров земли и заземляющих устройств. – М.: Энергоатомиздат, 1983. – 168 с.

8. Заборовский А.И. Электроразведка. – М.: Гостоптехиздат, 1963. – 424 с.
9. Акуленко С.А., Березина С.А., Бобачев А.А. Электроразведка методом сопротивлений. Под ред. В.К. Хмелевского и В.А. Шевнина. – М.: Изд-во МГУ, 1994. – 160 с.
10. Бургсдорф В.В., Якобс А.И. Заземляющие устройства электроустановок. – М.: Энергоатомиздат, 1987. – 400 с.
11. Колесников В.П. Основы интерпретации электрических зондирований. – М.: Научный мир, 2007. – 248 с.
12. Балков Е.В., Панин Г.Л., Манштейн Ю.А. Электротомография: аппаратура, методика и опыт применения [Электронный ресурс]. – Новосибирск: инс-т нефтегазовой геологии и геофизики им. А.А. Трофимука СО РАН, 2010. – 21 с. – Режим доступа: <http://www.nemfis.ru/etom.pdf>.
13. Hördt. A. Praktikumsunterlagen Angewandte Geophysik und Geoelektrik. – Technische Universität Braunschweig Institut für Geophysik und extraterrestrische Physik. – 2006. – 11 s.
14. Шевнин В.А., Колесников В.П. Оценка глубинности ВЭЗ для однородной и слоистой среды [Электронный ресурс] // Электронный журнал ГЕОразрез. – 2011. – №1(8). – С. 1-9. – Режим доступа: http://www.georazrez.ru/download/2011/08/Shevnin-Otcenka_glubinnosti_VEZ.pdf.
15. Руденко С.С., Колиушко Д.Г. Авторське свідоцтво України № 47198 від 14.01.2013. Компьютерная программа интерпретации результатов вертикального электрического зондирования "ВЭЗ-3".
16. Руденко С.С., Колиушко Д.Г. Авторське свідоцтво України № 47469 від 28.01.2013. Компьютерная программа автоматической интерпретации результатов вертикального электрического зондирования "ВЭЗ-2-Авто".
17. Линк И.Ю., Колиушко Д.Г., Колиушко Г.М. Математическая модель неэквипотенциального заземляющего устройства подстанции, размещенного в двухслойном грунте // Электронное моделирование. – 2003. – Т.25. – №2. – С. 99-111.
18. Колиушко Д.Г., Руденко С.С. Электрическое поле точечного источника тока в земле с трехслойной структурой // Электронное моделирование. – 2011. – Т.33. – №6. – С. 101-111.

REFERENCES: 1. *Pravila ulashtuvannya elektroustanovok. Rozdil 1. Zagal'ni pravila. Glava 1.7 Zazemlennya i zakhisni zakhodi vid urazhennya elektrichnim strumom* [Rules of the device electroinstallations. Chapter 1. General rules. Grounding and protective measures against electric shock]. Kyiv, Minenergovugillya Ukrayiny Publ., 2011. 72 p. 2. *Viprobuvannya ta kontrol' pristroyiv zazemlennya elektroustanovok. Tipova instruktsiya. SOU 31.2-21677681-19:2009* [Test and control devices, electrical grounding. Standard instruction. SOU 31.2-21677681-19:2009]. Kyiv, Minenergovugillya Ukrayiny Publ., 2010. 54 p. 3. Borisov R.K., Koliushko G.M., Grimud G.I. Technique to study the ground grids of electric power facilities. *Energetika i elektrifikatsiya – Energy and Electrification*, 2000, no.4, pp. 29-32. 4. Koliushko G.M., Dotsenko V.I., Koliushko D.G., Nedzel'skii O.S. Measuring system for diagnosis of the state of ground grids of electric facilities. *Visnyk NTU "KhPI" – Bulletin of NTU "KhPI"*, 2002, no.7, pp. 157-166. 5. Rezinkin O.L., Koliushko D.G. Inductive sensor for the diagnosis of high-voltage substation grounding. *Energetika i elektrifikatsiya – Energy and Electrification*, 1999, no.8, pp. 36-39. 6. Kandaev V.A., Sveshnikov N.Yu. Method for determination of contact between the vertical element and the grid circuit grounding *Pervaya Rossiiskaya konferentsiya po zazemlyayushchim ustroystvam: sbornik dokl* [First Russian Conference on ground grids: collection of reports]. Novosibirsk, 2002, pp. 149-155. 7. Kostruba S.I. *Izmerenie elektricheskikh parametrov zemli i zazemlyayushchikh ustroystv* [Measurement of electrical parameters of earth and ground grids]. Moscow, Energoatomizdat Publ., 1983. 168 p. 8. Zaborovskii A.I. *Elektrorazvedka* [Electroinvestigation]. Moscow, Gostoptekhizdat Publ., 1963. 424 p. 9. Khmelevskoy V.K., Shevnin V.A. *Elektrorazvedka metodom soprotivlenii* [Geoelectrical resistivity]. Moscow, MGU Publ., 1994. 160 p. 10. Bursdorf V.V., Yakobs A.I. *Zazemlyayushchie ustroystva elektroustanovok* [Grounding device of electrical installations]. Moscow, Energoatomizdat Publ., 1987. 400 p. 11. Kolesnikov W.P. *Osnovy interpretatsii elektricheskikh zondirovaniy* [Fundamentals of electrical sounding interpretation]. Moscow, Nauchnyi

mir Publ., 2007. 248 p. 12. Balkov E.W., Panin G.L., Manshtein Yu.A. *Elektrotomografiya: apparatura, metodika i opyt primeneniya* (Elektrotomografiya: equipment, technique and experience using) Available at: <http://www.nemfis.ru/etom.pdf> (accessed 5 November 2013). 13. Hördt A. *Praktikumsunterlagen Angewandte Geophysik und Geoelektrik*. Technische Universität Braunschweig Institut für Geophysik und extraterrestrische Physik, 2006. 11 p. 14. Shevnin V.A., Kolesnikov W.P. Otsenka glubinnosti VEZ dlya odnorodnoi i sloistoi sredy [Rating depth VES for the uniform and layered medium]. *Elektronnyi zhurnal "GEORazrez"*. – *Electronic Journal "GEORazrez"*. – 2011, no.1(8), pp. 1-9. Available at: http://www.georazrez.ru/download/2011/08/Shevnin-Otcenka_glubinnosti_VEZ.pdf (accessed 10 November 2013). 15. Rudenko S.S., Koliushko D.G. *Komp'yuternaya programma avtomaticheskoi interpretatsii rezul'tatov vertikal'nogo elektricheskogo zondirovaniya "VEZ-3"* [Computer software for the interpretation of vertical electrical sounding "VEZ-3"] Certificate of Authorship, UA, no.47198, 2013. 16. Rudenko S.S., Koliushko D.G. *Komp'yuternaya programma avtomaticheskoi interpretatsii rezul'tatov vertikal'nogo elektricheskogo zondirovaniya "VEZ-2-Avtio"* [Computer software for the interpretation of vertical electrical sounding "VEZ-2-Auto"] Certificate of Authorship, UA, no.47469, 2013. 17. Link I.Yu., Koliushko D.G., Koliushko G.M. A mathematical model is not an equipotential ground grids substation placed in a double layer *Elektronnoe modelirovaniye – Electronic modeling*, 2003, vol.25, no.2, pp. 99-111. 18. Koliushko D.G., Rudenko S.S. Electric field of a point source of current in the ground with a three-layer structure *Elektronnoe modelirovaniye – Electronic modeling*, 2011, vol.33, no.6, pp. 101-111.

Поступила (received) 02.06.2014

*Коліушко Георгій Михайлович¹, к.т.н., с.н.с.,
Коліушко Денис Георгієвич¹, к.т.н., с.н.с.,
Руденко Сергій Сергєєвич¹, аспірант, м.н.с.,
¹Национальный технический университет
"Харьковский политехнический институт",
61002, Харьков, ул. Фрунзе, 21,
e-mail: nio5_molnija@ukr.net*

*G.M. Koliushko¹, D.G. Koliushko¹, S.S. Rudenko¹
¹National Technical University "Kharkiv Polytechnic Institute"
21, Frunze Str., Kharkiv, 61002, Ukraine*

On the problem of increasing computation accuracy for rated parameters of active electrical installation ground grids.

In the paper, factors having effect on computation accuracy of ground grid rated parameters are analyzed. Directions and techniques for increasing the rated parameter computation accuracy are suggested. The techniques consist in improvement of both experimental and computational stages of electromagnetic diagnostics of the ground system condition.

Key words – ground grid, mathematical model, three-layer geoelectric structure.